

## 海底ケーブルの構造設計に関する研究

著者	藪田 哲郎
号	691
発行年	1983
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11640">http://hdl.handle.net/10097/11640</a>

氏 名	藪 田 哲 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 1 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 49 年 3 月 東京大学大学院工学研究科産業機械工学 専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	海底ケーブルの構造設計に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 渥美 光 東北大学教授 川崎 正 東北大学教授 北條 英典 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 虫明 康人

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

情報化社会への進展が著しい今日、多種多様な情報を経済的かつ能率的に伝送可能とする新しい技術の開発が、ますます重要となってきた。各種伝送方式の経済化を図る上で、伝送線路（ケーブル）の占める割合は大きく、ケーブルとその構成部品について、合理的かつ経済的な設計法を確立する必要が生じてきた。本報は、各種伝送線路のなかで、特に厳しい設計条件下に置かれている海底ケーブルを研究対象に取り上げ、図 1 に示す海底同軸ケーブルおよび海底光ファイバケーブルの構造設計法を確立するため研究を行ったものである。このため、本研究では、従来未解明であった光ファイバ心線のケーブル化に際して問題となる心線のマイクロベンド現象、および海底ケーブルの敷設・引揚に際して問題

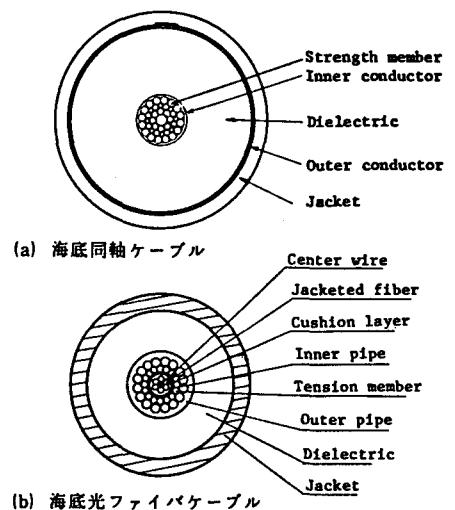


図 1 ケーブル構造断面図

となるキンク現象等の解明も行った。

## 第2章 海底ケーブル設計上の研究課題

海底ケーブルは、水深数千mの深海部に敷設するために、ケーブル自重による巨大な張力、海底面での数百気圧に及ぶ水圧、敷設装置による側圧および曲げと、陸上ケーブルに比較して非常に苛酷な設計条件下に置かれている。しかるに従来これらの諸条件を考慮した十分な構造設計法は見当らない。このため本章では最初に設計上考慮すべき主要な課題を下記の通り明らかにした。

海底同軸ケーブルの構造設計上の課題は、外部導体の座屈および疲労現象に関連する曲げ特性、深海部への敷設、漁探障害時の外力からケーブルを保護するための引張特性である。海底光ファイバケーブルに関しては、光ファイバの機能を保護する観点から、敷設、引揚時のケーブルの伸びを抑制する設計法、同時に敷設時の側圧および水圧に対する耐圧設計法が重要な課題である。また、光ファイバ心線のケーブル化時に、光損失増加の原因となるマイクロベンド現象の解明、および海底ケーブル敷設時の障害原因となるキンク現象の解明も構造設計上の重要な課題である。

## 第3章 外部導体の曲げ座屈（弾性クッション層を有する円筒殻の曲げ座屈）の解析

海底同軸ケーブルの曲げ特性の解明には、外部導体の座屈現象と疲労現象の解明が課題となる。本章では、このうち座屈現象解明の第一段階として、外被および絶縁体が外部導体に弾性クッション効果を与えるものと見なし、内外層に異なる弾性クッション層を有する円筒殻の曲げ座屈の解析を行った。本解析では、弾性クッションの効果として、Seideのスプリング定数の概念を拡張して導入し、Donnellの方程式を用いて、曲げ応力下の偏微分方程式を導き、Calerkin法を適用して座屈発生応力を求めた。最後に数値解析を行い、従来明らかにされていなかった弾性クッション層の曲げ座屈抑止効果を定量的に明らかにし、構造設計に寄与した。

## 第4章 無外装海底同軸ケーブルの構造設計

本章では、無外装海底同軸ケーブルの構造設計について、ケーブルの引張特性および曲げ特性の両面から論じている。引張特性が問題となる複合内部導体（中心抗張力体）の設計については、それが鋼線を用いた撚り線構造であることに着目して、撚り線理論を導入した解析を行った。その結果、中心抗張力体の最大抗張力に与える撚りピッチの影響が大きいことを明らかにし、最大抗張力を得る撚りピッチの選定法を示した。

一方、外部導体の曲げ疲労特性に関しては、外部導体材質が銅またはアルミニウムの場合で、その疲労特性が全く異なり、この差異はき裂発生機構の差によることを明らかにした。また、外部導体に加わるひずみ $\varepsilon$ とき裂発生に至る曲げ回数 $N$ の間には、 $\varepsilon \cdot N^{\frac{1}{2}} = \text{一定}$ の関係が成り立つことを明らかにした。外被の曲げ特性に及ぼす影響を定量化するために、スプリング定数の手法を導入し、曲げ特性の評価関係として $(\varepsilon \cdot N^{\frac{1}{2}})$ の値を用いて実験値を整理し、外被の影響の定量化を行った。これらのき裂発生機構および外被のスプリング定数の解析結果から、外部導体および外被の設計指針を明らかにした。

## 第5章 外装海底同軸ケーブルの構造設計

外装海底ケーブルの設計法の確立を図るために、主要課題である引張特性を撚り線理論を用いて解析した。本章では、特に中心抗張力体と外装線を併用した構造を対象に解析を進めたが、この構造は外装線の撚りピッチが張力分担率に大きく影響することを明らかにし、最大設計張力を与える撚りピッチの選定方法を、無次元化した撚り線理論を用いて提案した。

## 第6章 光ファイバ心線のマイクロベンド現象の解析

光ファイバ心線のマイクロベンド現象は、光ファイバに微小曲りが誘起され、光損失が急増する現象である。この現象は、光ファイバ心線のケーブル化時、およびケーブル敷設時に見られるが、その発生機構は明確にはされていなかった。本章では、低温時特性および側圧特性の両面から、この機構の解明を理論的及び実験的に行った。

低温特性については、光ファイバが初期変形を有する場合および初期変形の無い場合で、光損失増加の形態は全く異なる。初期変形の無い場合には、ある低温度で急激に光損失が増加する現象が認められ、この現象は、二次被覆の収縮により、光ファイバが座屈現象を起して、マイクロベンド現象を生じることを明らかにした。一方、実用上しばしば見受けられる初期変形を有する光ファイバの場合には、二次被覆の収縮による初期変形が成長し、比較的高い温度から光損失の微増現象が存在することを明らかにした。また、光ファイバ心線構造モデルを用いて、低温時の光損失増加量の推定を可能とし、低温で光損失増加を抑制する構造設計指針を提案した。

側圧作用時の光ファイバ心線のマイクロベンド現象については、二次被覆のシェル効果、緩衝層の緩衝効果、光ファイバの曲げ剛性を考慮した心線構造モデルを提案し、側圧作用時の光ファイバに誘起される変形を明らかにした。本構造モデルを用いると、側圧作用時の光損失増加量と、心線構造の関連を明確にすることができ、側圧作用時の光損失増加を抑制する設計指針が得られた。また、長さ方向に周期的な側圧が作動する場合、最も光損失が増加しやすい周期が存在することを示し、その周期と心線構造の関係を明らかにした。

## 第7章 海底光ファイバケーブルの構造設計

光ファイバの破断ひずみは金属線に比較して非常に小さく、敷設、引揚時のケーブルの伸びを抑制する観点から海底光ファイバケーブルの構造設計を進める必要がある。敷設・引揚時のケーブルの伸びは、ケーブルの自重によって発生するものであり、単に抗張力体の断面積を増大させることによって伸びを減じることはできない。このため、抗張力体の構造および材料の両面から解析を行い、伸びを抑制するためには、構造設計を抗張力体の撚り戻しおよび半径方向の変位の抑制、材料面では高ヤング率低密度の抗張力体を用いると伸び抑制の効果があることを明らかにした。

一方、光ファイバを敷設装置による側圧、海底面の水圧から保護するために、耐圧特性向上についても解析を行い、特に抗張力体の鋼撚り線の耐圧機能効果を明らかにした。

本設計指針に基づく海底光ファイバケーブルを用いて、1982年1月に現場試験を行い、当時、世界で最も低損失で長距離（40 km）の海底伝送路を実現した。

## 第 8 章 海底ケーブルのキンク現象の解析

海底ケーブルのキンク現象とは、ケーブルの敷設および引揚時に、ケーブルのねじれによってケーブルに輪が形成され、張力が再度作用することにより、輪が引きしぼられ障害に結びつく現象である。本章では、エネルギー法を用い、ケーブルの変形を線近似し、キンク現象の経過段階の安定状態について理論解析を行った。この結果ケーブルの輪の形成は、ねじれエネルギーによる変形状態から曲げエネルギーによる変形状態に遷移する途中の不安定現象であり、一旦、ケーブルの輪が形成されると、安定を保ち、再度張力が作用すると、輪が引きしぼられることを明らかにした。また、理論解析の妥当性を検証するために、光ファイバ心線を用いたシミュレーション実験を行い、理論解との比較を行った。これらの結果から、キンク現象を支配する要因は、ケーブルの曲げ剛性とねじれ剛性の比、ケーブル径、残留ねじれ、ケーブルスラック（ケーブルのたるみ）の 4 つであることを明らかにし、これらの要因を用いてキンク発生条件を明確にした。また、ケーブルスラックの観点から、図 2 に示すように、キンク現象におけるケーブル変形を統一的に明らかにした。

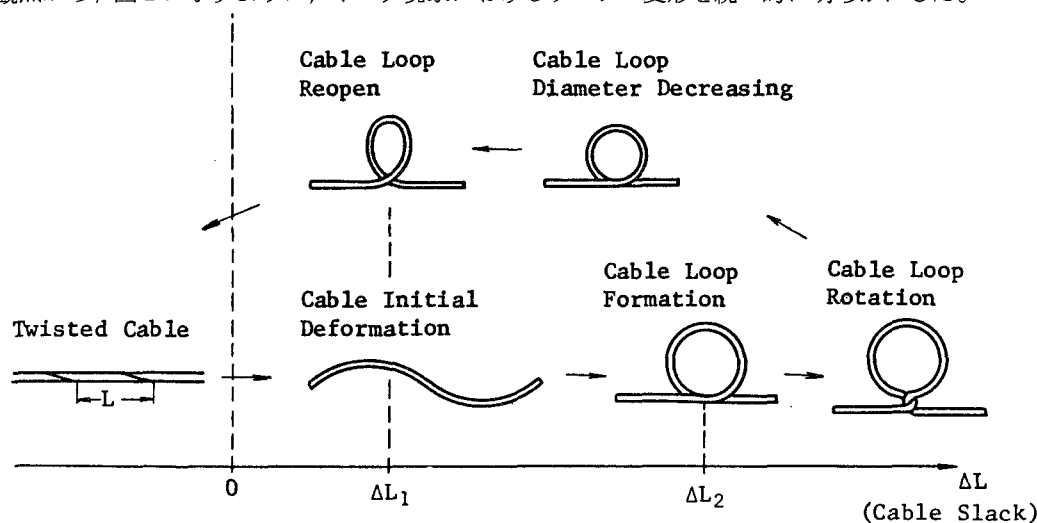


図 2 ケーブルキンク現象の分類

## 第 9 章 結 言

本報で得られた成果を要約すると次の通りである。

- i) 円筒殻の曲げ座屈に及ぼす弾性クッション層の影響を定量的に明らかにした。
- ii) 海底同軸ケーブルに必要な引張及び曲げ特性を与える構造設計法を明らかにした。
- iii) 光ファイバ心線のマイクロベンド現象の発生機構を明らかにし、マイクロベンド発生を抑制する心線構造の設計指針を明らかにした。
- iv) 海底光ファイバケーブルに要求される伸び特性と耐圧特性の向上を目指した構造設計法を明らかにした。
- v) 海底ケーブルのキンク現象の発生機構の解明を行い、キンク発生を支配する要因を明らかにした。

## 審 査 結 果 の 要 旨

情報化社会への進展に伴い、経済性と能率の高い情報伝送の技術開発が進められているが、各種伝送方式中ケーブルの占める割合は大きい。このうち海底ケーブルは最も厳しい環境下で使用されるため、従来の経験則とは異なる明解な設計法の確立が要望されている。

本論文は、海底同軸ケーブルおよび海底光ファイバークケーブルに対する設計課題を明確に述べ、適切な構造モデルを設定して、理論ならびに実験解析を行い、創意に富むケーブルの構造設計法を提案したもので、全編9章よりなる。

第1章は序論であり、本論文の意義と目的について述べている。

第2章では、各種海底ケーブルの機構特性、負荷特性を分析し、それぞれに対する設計上の課題を明らかにしている。

第3章では、海底同軸ケーブルの設計に必要な、外部導体の曲げによる座屈現象の解明のため、内外層に異なる弾性クッション層を有する円筒殻の数値モデルを設定して、弾性解析を行い、外部導体の曲げ抑止に及ぼす、外被と絶縁体のクッション効果を定量的に明らかにしている。

第4章では、無外装海底同軸ケーブルの設計の主要点である、中心抗張力体の引張り特性を撚り線理論と実験によって解析し、最大抗張力を与える撚りピッチの選定法を示している。同時に外部導体の曲げ疲労の実験解析を行い、曲げ特性の劣化につながるき裂発生を評価する関数を決定し、これを用いて曲げ疲労に対する外被のスプリング効果を定量的に明らかにし、外部導体と外被の設計指針を示している。

第5章では、外装同軸ケーブルの設計のため、ケーブルの引張り特性を、中心抗張力体と外装線との張力分担率の面より考察し、最大設計張力を与える外装線の撚りピッチの選定法を理論と実験とにより明らかにしている。

第6章では、海底光ファイバークケーブルの設計に重要な、光損失増加の現象に対処するため、心線、二次被覆層と緩衝層とよりなる構造モデルを用いて、理論および実験解析を行い、低温時および側圧作用時のモデル要素の変形挙動を明らかにして、光損失増加の現象が二次被覆層の収縮による心線の座屈によることを見出し、モデル要素の材料定数、温度定数および断面寸法を選択して、座屈を抑制する設計法を提案している。

第7章では、海底光ファイバークケーブルの伸び抑制と耐圧設計法について述べている。

第8章では、海底ケーブルの損傷につながるケーブルのもつれ（キンク）現象の解明を、エネルギー理論とシミュレーション実験により行い、現象を支配する要因を明確にして、設計に寄与している。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、機械特性に優れた海底同軸ケーブルと低損失海底光ファイバークケーブルの開発を目的として、初めて機械設計法に準拠した独自の設計法を提案し、理論的、実験的にその有効性を立証したもので、機械工学ならびに通信工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。